

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA NUEVA UNIDAD TERMINAL: INTEGRACIÓN DE UN SUELO RADIANTE EN UN SISTEMA DE VENTILACIÓN POR PLENUM**

**Francisco Fernández Hernández(1); José Manuel Cejudo López(1); Alberto Fernández Gutiérrez(1); Antonio Carrillo Andrés; Fernando Domínguez Muñoz(1)**

(1)Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Grupo de Energética,  
franciscofh@uma.es

**Resumen** *En los últimos años se han empezado a utilizar sistemas de suelo frío para combatir parte de la carga sensible de los locales. Como la temperatura superficial del suelo está limitada por el riesgo de condensación, un sistema de suelo frío suele ir complementado con un sistema de ventilación que combate el resto de la carga sensible que el suelo no es capaz de combatir, además de las cargas de ventilación y latente del local.*

*La integración de un sistema de ventilación con un suelo radiante requiere un espacio complementario para la unidad de tratamiento de aire, los conductos de ventilación y los difusores de aire, así como una complejidad añadida en algunos aspectos del sistema: diseño, dimensionamiento, control, etc. Con el fin de evitar la instalación de un sistema de ventilación y un suelo radiante por separado, y unificar ambas unidades terminales, se propone en este estudio una nueva unidad terminal que integra el suelo radiante con un sistema de ventilación por plenum [1,2]. El sistema consiste en una estructura modular que se dispone en el forjado y forma conductos de ventilación por donde circula el aire. Sobre esta estructura se coloca la red de tuberías, que quedan embebidas en la capa de mortero y sobre la que se dispone el acabado superficial del suelo. Las bocas de difusión se sitúan en el suelo, pudiendo ser de ventilación por mezcla o desplazamiento.*

*En este trabajo se describe la nueva unidad terminal y se realiza un análisis experimental de la misma. Se han llevado a cabo ensayos del sistema en un suelo de 3x3 m<sup>2</sup>, para unas condiciones de verano. Se describe el montaje del experimento, la monitorización llevada a cabo de los parámetros más importantes del sistema y el procedimiento experimental. Los resultados experimentales demuestran la influencia positiva de la capa de suelo radiante en el comportamiento térmico del aire de ventilación a su paso por el plenum y en la temperatura de la zona. La inserción de la capa de suelo radiante frío entre la zona y el plenum permite combatir carga sensible de la zona e impide el calentamiento excesivo del aire de ventilación a su paso por el plenum, típico de estos sistemas. En consecuencia, se demuestra la idoneidad de la integración de ambos sistemas en una única unidad terminal.*

*El trabajo se encuadra en el proyecto UNICLIMA, financiado por AZVI en el marco de un proyecto de la Corporación Tecnológica de Andalucía y el CDTI.*

**Palabras clave:** Suelo radiante frío, sistema de ventilación por plenum, unidad terminal conjunta, decaimiento térmico, ensayo experimental

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas radiantes de climatización tienen importantes ventajas frente a los basados en la impulsión de aire frío y seco: temperaturas de producción más elevadas con el consiguiente aumento en el rendimiento de la producción, mejor integración arquitectónica, flexibilidad frente a cambios en la compartimentación de los locales, etc. Sin embargo, al no utilizar el aire como elemento caloportador, requieren un sistema de ventilación que suministre el aire exterior requerido por la normativa. El aire de ventilación previamente tratado combate la carga latente y la sensible que el suelo, debido a la limitación del riesgo de condensación, no es capaz de combatir.

La aplicación de un suelo radiante frío con un sistema de ventilación por desplazamiento es muy interesante para la climatización de grandes volúmenes de aire, como aeropuertos, estaciones, museos, etc. Zhao [3] estudia este sistema en el aeropuerto de Xi'an Xianyang (China) y demuestra las ventajas en términos de confort y eficiencia energética respecto a los sistemas convencionales de aire.

Siguiendo esta línea de investigación, se propone una nueva unidad terminal que integra un suelo radiante en un sistema de ventilación mediante un plenum presurizado bajo el suelo (UFAD). El aire de ventilación circula por conductos horizontales situados por debajo de la capa de suelo radiante y se impulsa a la zona a través de un difusor de suelo situado en cualquier parte del recinto. Una unidad de este tipo tendría ventajas significativas respecto a los sistemas por separado: mejora la integración del sistema de ventilación, mejora la convección entre el aire y el suelo, potenciando el mecanismo convectivo de transferencia de calor, y minimiza el riesgo de condensación, porque el aire en contacto con el suelo sería el exterior, una vez se haya tratado, en lugar del aire del local.

Sin embargo, es importante analizar la influencia de la capa activa de suelo radiante en un aspecto fundamental de los sistemas de ventilación por plenum: el fenómeno conocido como "decaimiento térmico" (TD), definido como el aumento de temperatura del aire de ventilación en su avance por los conductos, hasta su impulsión a la zona. El TD es producido por las ganancias convectivas de calor que se transmiten desde la zona hacia el plenum. Lee et al [4] estudian, mediante una simulación anual, la influencia del TD en un sistema UFAD, para un edificio de oficinas. Los resultados revelan un aumento de la temperatura del aire, desde la entrada al suelo técnico hasta la impulsión a la zona a través de los difusores de hasta 4.7°C en las horas de ocupación. Como solución proponen el aumento del caudal de aire de ventilación para combatir la carga sensible, pero esto afecta de forma negativa a la estratificación del aire de la zona, el confort térmico y el consumo en los ventiladores. Bauman et al [5] demuestran que la cantidad de calor transferida al plenum de aire desde la zona puede alcanzar el 35-40% de la carga de refrigeración total, pero la mayoría de este calor transferido es de nuevo introducido en la zona a través del aire de impulsión y produce un aumento del TD. Este efecto puede ser muy importante especialmente en zonas con grandes superficies acristaladas y con gran exposición a la radiación solar directa.

El objetivo principal de este artículo es la presentación de la nueva unidad terminal y la realización de un análisis experimental de la misma para estudiar la influencia del suelo

radiante en el aire de ventilación a su paso por el plenum y en las condiciones de confort de la zona.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

La figura 1 muestra la unidad terminal propuesta en este trabajo. Se trata de una estructura de paneles modulares que se colocan sobre el forjado o capa constructiva. Cada módulo tiene una dimensión de 60x60 cm<sup>2</sup> y algunos disponen de un agujero circular para la instalación del difusor de suelo. Están fabricados de polipropileno con un 30% de fibra de madera. El espacio entre la capa y el módulo crea un plenum presurizado por el que circula el aire de ventilación hacia los difusores de suelo. Sobre la estructura modular y fijada con tetones se dispone la red de tuberías, que es cubierta con una capa de mortero de nivelación y el acabado superficial del suelo (mármol, gres, cerámico, etc.). De esta manera un suelo radiante queda integrado en un sistema de ventilación por plenum en la misma unidad terminal.

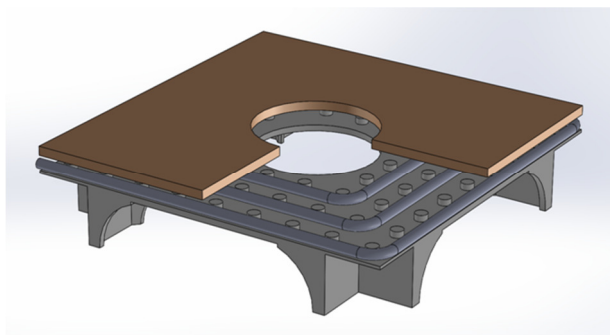


Figura 1. Unidad terminal de suelo radiante con conductos de ventilación.

La figura 2 muestra el esquema general del sistema. Por un lado, en modo refrigeración, la bomba de calor produce agua fría entre 15-20°C que impulsa al suelo radiante provocando una disminución de la temperatura superficial del suelo en torno a 19-20°C, lo más baja posible para aumentar la capacidad de refrigeración del sistema evitando la condensación en la superficie. Simultáneamente, el aire exterior de ventilación es tratado en una unidad de tratamiento de aire (UTA) para satisfacer las necesidades de ventilación de la zona y combatir toda la carga latente y la carga sensible que el suelo radiante no es capaz de combatir. El aire es introducido en el suelo técnico y se impulsa a través de los difusores de suelo en la zona con una velocidad baja, favoreciendo la ventilación por desplazamiento. En la parte superior de la habitación se instala una unidad de extracción de aire. Con esta configuración se pretende provocar una estratificación de temperatura del aire de la zona favorable.

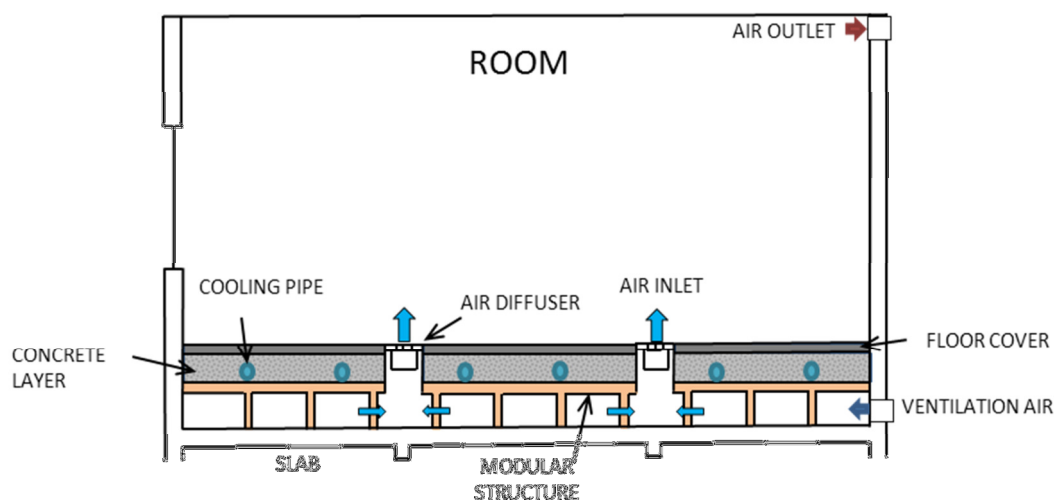


Figura 2. Esquema general de la unidad terminal.

### 3. ENSAYO EXPERIMENTAL.

#### 3.1. Montaje del prototipo experimental.

Se describe el montaje experimental para el estudio del comportamiento térmico de la unidad terminal propuesta. Para ello se ha construido un suelo de 3x3 m<sup>2</sup> que asemeja a la unión de 25 módulos unidos entre sí. A expensas de la fabricación de los módulos de polietileno (PET), se recurre a una estructura de cartón prensado (Fig. 3a). La zona inferior del suelo por donde circula el aire de ventilación tiene una altura de 8 cm. Éste se introduce a través de un conducto por una de las esquinas del suelo. El módulo central incorpora el hueco donde se sitúa el difusor de aire, con un diámetro de 22 cm. Sobre esta estructura se dispone una capa de corcho de 2.5 cm de espesor como aislamiento en la que se apoyan los tubos, con una configuración en espiral (Fig. 3b). Los tubos son de polietileno de 16.2/20 cm de diámetro. La separación entre tubos es de 18 cm. El mortero se vierte sobre las tuberías para formar una capa uniforme de 3 cm de espesor (Fig. 3c). Con el objetivo de crear un espacio interior en el que las condiciones del aire se mantengan estables, se monta una carpa de lona de 2.5 m de altura (Fig. 3d).

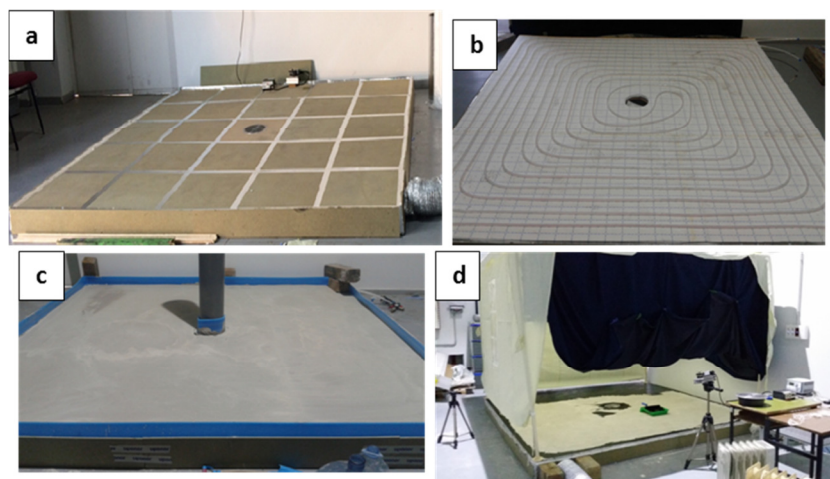


Figura 3. Montaje del ensayo experimental.

### 3.2. Monitorización del experimento. Instrumentación.

Para el estudio del comportamiento térmico del sistema, es necesaria una monitorización exhaustiva del experimento. A continuación se expone una descripción detallada de estas mediciones. El paso de tiempo de las medidas es de 30 segundos.

La temperatura de la superficie del suelo se mide mediante 8 sondas de temperatura TMC6-HE acopladas a sensores tipo Hobo U12. El suelo se divide en 9 cuadrados iguales de 1 m<sup>2</sup> y se coloca un sensor en el centro de cada uno de ellos, excepto en el central donde se sitúa el difusor (Figura 4a). Además de los sensores, se ha utilizado una cámara termográfica para evaluar la distribución de temperatura superficial del suelo.

La temperatura del aire se monitoriza con 7 sensores tipo Hobo U12, colgados a diferentes alturas (5, 90 y 160 cm) con el objetivo de medir el perfil vertical de la temperatura del aire y comprobar si existe una estratificación de temperaturas en la zona. Además, se coloca en el centro de la habitación y a una altura de 1.80 m un termómetro de globo que permite obtener la temperatura operativa de la zona (figura 4b).

Un equipo de aire acondicionado con ventilador de velocidad variable permite controlar la temperatura y caudal del aire de ventilación. El aire es conducido por un conducto hasta la entrada del suelo técnico. La temperatura del aire de ventilación se mide con los Hobo U12 en diferentes puntos del plenum (figura 4c): entrada del plenum, en puntos alrededor del difusor y justo debajo del difusor, que corresponde al aire de impulsión a la zona. Además, en los puntos 1 a 5, se utilizan sondas TMC6-HE para medir la temperatura de la superficie superior del plenum. Como resultado, se obtiene la distribución de temperaturas del aire de ventilación dentro del plenum y permite calcular la transferencia de calor entre el suelo radiante y el aire de ventilación. La velocidad del aire se mide mediante un anemómetro de hilo caliente colocado en el conducto justo unos centímetros antes de la entrada del aire en el suelo técnico. La temperatura de entrada del agua al suelo se regula a través del controlador digital de la bomba de calor. Tanto a la entrada como a la salida, se han colocado dos PT100 de contacto

para medir el salto térmico del agua que tiene lugar en el suelo. Además, se ha instalado un caudalímetro que mide el caudal de agua de entrada.

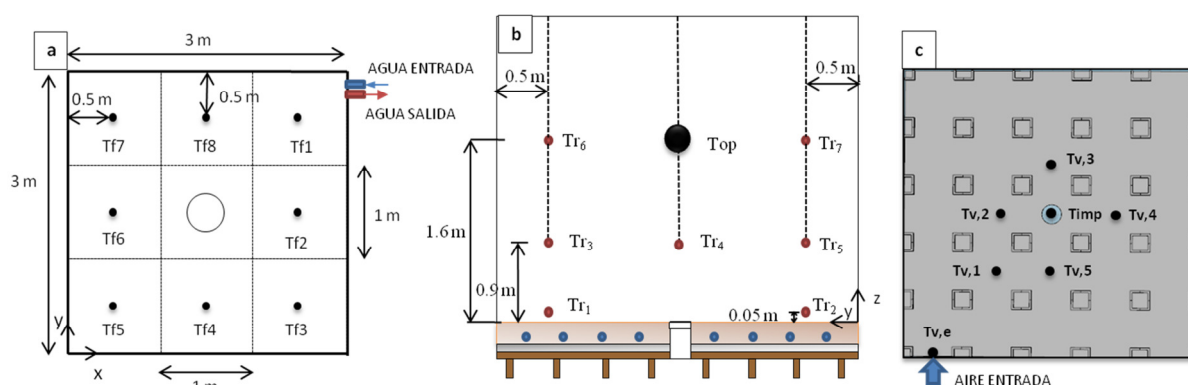


Figura 4. Esquema de la monitorización. a) Temperatura del suelo. b) Temperatura del aire de la zona. c) Temperatura del aire de ventilación.

### 3.3. Descripción del ensayo experimental.

Se propone un experimento con el objetivo de analizar la influencia que tiene la presencia de un suelo radiante en un sistema de ventilación por plenum y, en particular, en el TD, y, por otro lado, estudiar el comportamiento del sistema en una zona para un día típico de verano.

Inicialmente, la temperatura superficial del suelo es de 25°C, por lo que se activa el suelo radiante en modo frío, con una temperatura de consigna de entrada del agua de 15°C, y con un caudal de 20 l/hm<sup>2</sup>. Simultáneamente, el aire exterior cuya temperatura está en torno a 26-27°C, se introduce directamente en el plenum para ser impulsado a la zona a través del difusor de suelo, con un caudal de 250 m<sup>3</sup>/h. En las dos primeras horas se mantiene el modo de ventilación con el suelo frío. A partir de las dos horas, la temperatura de la zona empieza a subir, por lo que se activa el modo de refrigeración. El aire de ventilación se trata en la unidad de tratamiento de aire disminuyendo su temperatura hasta los 16-17°C antes de ser introducido en el plenum. De esta manera, el aire de ventilación se enfría unos grados por debajo de la temperatura de impulsión de consigna (21-22°C) con el objetivo de tener en cuenta el TD. Finalmente el estado estacionario se consigue a las cuatro horas y media, en el que la temperatura del suelo permanece constante y se mantiene hasta las cinco horas.

## 4. RESULTADOS.

### 4.1. Análisis térmico de la influencia del suelo radiante en un sistema de ventilación por plenum.

La figura 5 muestra, en el eje izquierdo, la temperatura del aire de ventilación de entrada al plenum (Tv), la temperatura de impulsión a la zona (Ts) y la temperatura de la superficie superior del plenum (Tp), así como, en el eje derecho, el TD, que se calcula como la

diferencia entre la temperatura del aire de impulsión y la de entrada al plenum. Se añade un esquema a la figura de estas temperaturas.

En el periodo de ventilación, la impulsión del aire directamente del exterior implica que la temperatura de entrada del aire de ventilación sea más alta que la temperatura de la superficie del plenum, por lo que el aire tiende a enfriarse a su paso por los conductos, consiguiendo, no sólo eliminar el TD, sino que se impulse a una temperatura inferior a la exterior. Esto es debido a la presencia de la capa activa de suelo que impide la transferencia de calor desde la zona hacia el plenum, tal y como ocurre en los sistemas convencionales, evitando el fenómeno del TD y, simultáneamente, combatiendo parte de la carga sensible, debido al intercambio de calor radiante con la zona. En la segunda fase del experimento, se activa el modo de refrigeración y, en pocos minutos, el aire de entrada al plenum disminuye su temperatura rápidamente hasta los 16°C, mientras que la temperatura de la superficie del plenum y la temperatura del suelo disminuyen gradualmente debido a la inercia térmica de la capa de hormigón. En consecuencia, el aire a su paso por los conductos sufre en estos primeros minutos un calentamiento importante que se ve reflejado en el aumento del TD hasta los 5°C. A medida que pasa el tiempo, el aire de entrada al plenum (controlado por la unidad de tratamiento de aire) se estabiliza en torno a 16-17°C, mientras que el aire de impulsión se va enfriando lentamente hasta llegar al estacionario a un valor de 19.4°C, lo que provoca un TD de 2.5°C. En este instante, la temperatura de la superficie del plenum es de 19.5°C. En este modo de operación, la temperatura de la superficie del plenum es, en todo momento, más alta que la temperatura del aire de ventilación, por lo que el aire de ventilación tiene a aumentar su temperatura hasta la impulsión. Sin embargo, el TD sería más alto sin la presencia del suelo radiante, que impide la transferencia de calor de la zona hacia el plenum y un aumento de la temperatura superficial del plenum. Además, este efecto sería aún más grave en el caso de edificios con grandes áreas de superficies acristaladas que permitan el paso de la radiación solar directa que incide directamente sobre el suelo. En este caso, una alta ganancia solar es combatida directamente por el suelo radiante frío con un incremento considerable en la capacidad de refrigeración e impidiendo un aumento importante del TD.

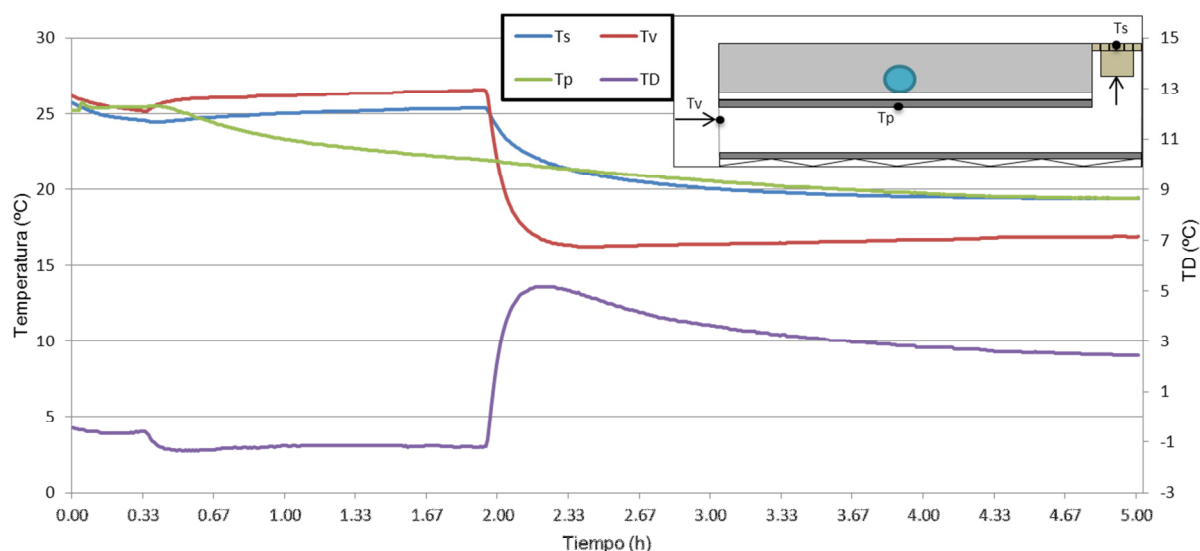


Figura 5. Evolución de las temperaturas en el paso del aire en el plenum.

#### 4.2. Capacidad de refrigeración de la unidad terminal en la zona.

La figura 6 representa el comportamiento térmico de la unidad terminal en la zona. Se muestran la temperatura operativa ( $T_{op}$ ), la temperatura media del aire a una altura de 160 cm ( $T_{r_{160\text{ cm}}}$ ), la temperatura de impulsión del aire de ventilación ( $T_s$ ), la temperatura exterior ( $T_{ext}$ ) y la temperatura superficial media del suelo ( $T_f$ ).

Durante las dos primeras horas, la temperatura exterior es inferior a  $28^\circ\text{C}$  y el sistema funciona con el suelo radiante frío y se impulsa el aire directamente del exterior. En estas circunstancias, se observa que la temperatura operativa y la temperatura de la zona se mantienen en torno a  $26^\circ\text{C}$ , ya que es el suelo radiante frío el que combate la carga sensible existente. Cuando la temperatura exterior supera los  $28^\circ\text{C}$  se activa el modo de refrigeración en la ventilación, reduciendo la temperatura del aire de impulsión a  $16^\circ\text{C}$ , mientras que la temperatura del suelo continúa descendiendo de forma gradual. Durante las siguientes 3 horas, la ventilación es la encargada de combatir la carga sensible restante que el suelo no es capaz de combatir. Finalmente, en el régimen estacionario, con una temperatura exterior de  $30^\circ\text{C}$ , el suelo radiante se estabiliza en  $20^\circ\text{C}$  y con un aire de impulsión de  $17^\circ\text{C}$  se consigue mantener una temperatura de confort en la zona.



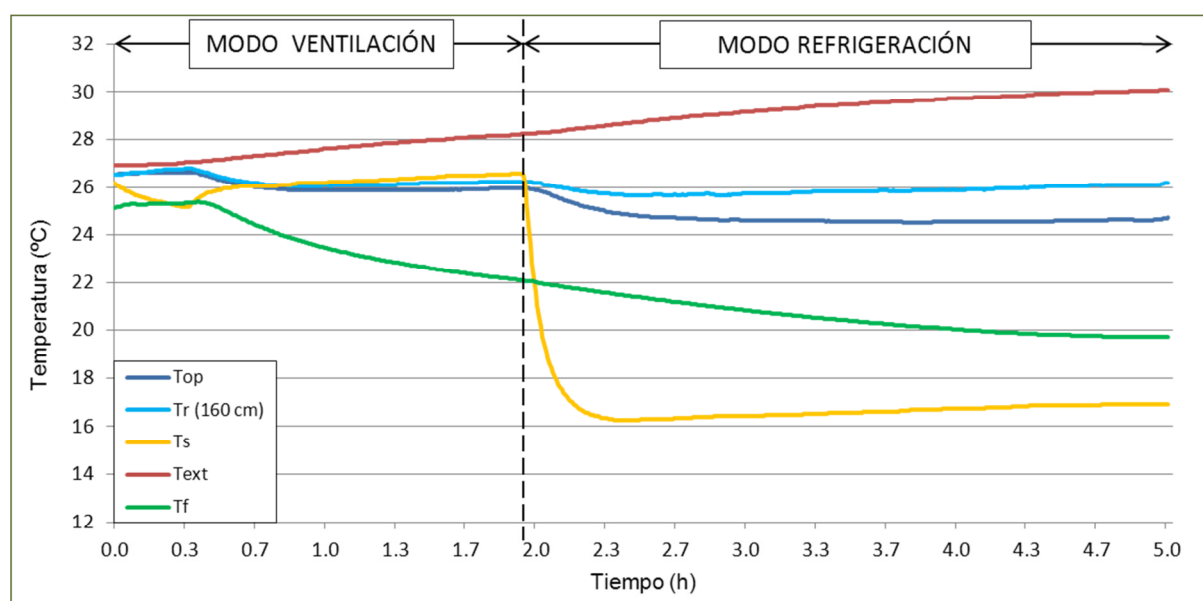


Figura 6. Evolución de las temperaturas en el análisis del paso del aire en el plenum.

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este estudio analiza el comportamiento térmico de un nuevo sistema de climatización: la integración, en una única unidad terminal, de un suelo radiante en un sistema de ventilación por plenum. Para ello se lleva a cabo la instalación del sistema en una zona con una superficie de 3x3 m<sup>2</sup>. Se realizan ensayos, en días típicos de verano, con una monitorización exhaustiva de las variables que afectan al comportamiento térmico del sistema.

El ensayo representado permite analizar la influencia de un suelo radiante en el TD, o calentamiento del aire de ventilación a su paso por el plenum antes de ser impulsado en la zona, muy típico en los sistemas de ventilación por plenum. El ensayo se divide en dos partes: el modo de ventilación y el modo de refrigeración. Los resultados demuestran la influencia positiva de la capa de suelo radiante que, además de combatir parte de la carga sensible de la zona, minimiza el TD en el plenum al impedir el paso de la ganancia convectiva de calor desde la zona hacia el plenum. Además, en el modo de ventilación, la temperatura del aire de entrada en el plenum es mayor que la temperatura de la superficie del plenum, por lo que no sólo no se produce un calentamiento del aire, sino que además se impulsa más frío que el exterior. En ambos modos se consigue el confort en la zona.

## REFERENCIAS

1. F. Fernández Hernández, J.M. Cejudo López. F. Domínguez Muñoz, A. Carrillo Andrés. Unidad terminal de suelo frío con ventilación incorporada. VII Congreso Ibérico de Ciencias y Técnicas del Frío. Tarragona 18,19 y 20 de Junio 2014.
2. F. Fernández Hernández, J.M. Cejudo López. A. Fernández Gutiérrez, C. Del Pino Peñas. Estudio experimental y modelización matemática de una unidad de suelo frío

con ventilación incorporada. IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. Cartagena 3,4 y 5 de Junio 2015.

3. K. Zhao, X. Liu, Y. Jiang. On-site measured performance of a radiant floor cooling/heating system in Xi'an Xianyang International Airport. *Solar Energy*, 2014, vol 108, pp. 274-286.
4. K. H. Lee, S. Schiavon, F. Bauman, T. Webster. Thermal decay in underfloor air distribution (UFAD) systems: Fundamentals and influence on system performance. *Applied Energy* 91 (2012), pp. 197-207.
5. F. Bauman, H. Jin, T. Webster. Heat transfer pathways in underfloor air distribution (UFAD) systems. *ASHRAE Transactions* 2006; 112 (2).